

В.Н. БОРЩЁВ, д-р. техн. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков;
И.Ш. НЕВЛЮДОВ, д-р. техн. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков;
М.А. ПРОЦЕНКО, инж., ХНУРЭ, Харьков;
И.Т. ТЫМЧУК, инж., ХНУРЭ, Харьков;
И.С. ХАТНЮК, инж., ХНУРЭ, Харьков.

СБОРКА ДЕМОНСТРАТОРА ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЖАТОЙ БАРИОННОЙ МАТЕРИИ

Розглянуто основні принципи побудови і функціонування детектуючих систем для міжнародного СВМ-експерименту, технологічні методи та прийоми виготовлення гібридних мікросбірок для сенсорних систем, результати випробування демонстратора трекової систем. Показано ефективність використання розробленої та запропонованої фахівцями ДП НДТІП повністю алюмінієвої COF-технології (chip on flex) у технологічному процесі збирання детекторного модуля

Мікростриповий демонстратор, комутаційний кабель, COF-технологія, гібридні мікросбірки.

In the article the principles of construction of the microstrip demonstrator CBM01 module for CBM experiment with application of flexible aluminum-polyimide commutation cables are considered.

The efficiency of offered completely aluminum COF- assembly technology (chip on flex) which provide reduction of the technological cycle and manufacturing costs, minimization of mass-dimension characteristics, high-density assembling, capability of three-dimensional arrangement in the form of multilayer blocks and packages with higher functional content is shown.

Microstrip demonstrator, commutation cable, COF-technology, hybrid micro-assemblies

Рассмотрены основные принципы построения и функционирования детектирующих систем для международного СВМ-эксперимента, технологические методы и приемы изготовления гибридных микросборок для сенсорных систем, результаты испытания демонстратора трековой системы. Показано эффективность использования разработанной и предложенной специалистами ГП НИТИП полностью алюминиевой COF-технологии (chip on flex) в технологическом процессе сборки детекторного модуля.

Микростриповый демонстратор, коммутационные кабель, COF-технология, гибридные микросборки.

Экономическое развитие современных стран тесно связано с созданием высокотехнологичных и наукоемких отраслей промышленности, успешное функционирование и интенсивное развитие которых определяет востребованность выпускаемой продукции на международном и внутреннем рынках, обеспечивает процесс информатизации общества и является основой процветания любого государства. К таким высокотехнологичным отраслям современной электроники относится радиационное приборостроение [1, 2]. Ключевым элементом во всех приборах регистрации радиационного излучения является детектор, чувствительность и избирательность которого определяет характеристики прибора. Твердотельные кристаллические детекторы (сцинтилляционные, стриповые, матричные пиксельные и т. д.) являются практически единственным типом сенсоров, обеспечивающим как

обнаружение невидимых излучений, так и определение их типа и спектра. Они широко используются в физике высоких энергий для измерения энергии элементарных частиц и их координат. Однако сфера их использования не ограничивается экспериментальной ядерной физикой, а распространяется также на сферы промышленного приборостроения, мониторинга технологических процессов, робототехники, контроля в автоматических системах управления, в системах технического зрения и т. д.

Целью данной работы является анализ принципов построения микростриповых сенсорных модулей для международного эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) с применением инновационной алюминиевой “chip on flex” (COF) технологии сборки и оценка их эксплуатационных характеристик.

1. Международный физический эксперимент “Сжатой Барионной Материи” CBM (Compressed Baryonic Matter). Международный эксперимент CBM проводится в рамках программы исследования вещества в сверхплотном состоянии на новом ускорителе научного центра GSI (г. Дармштадт, Германия).

CBM исследовательская программа исследует ядерную материю чрезвычайно высокой плотности. Материя таких форм, как полагают, существует внутри нейтронных звезд. В лаборатории плотная ядерная среда может быть создана при столкновениях тяжелоионных пучков с ядерными целями. Синхротроны (Дармштадт, Германия) обладают уникальными возможностями для этого исследования: с пучком интенсивностью до 10^{12} ионов за импульс и энергией пучка до 45 ГэВ/нуклон.

Коллаборация CBM включает в себя более 50 институтов (более 400 членов) из перечисленных выше стран [2–5].

Центральный компонент CBM-эксперимента – кремниевая трековая система (STS) – служит для измерения траекторий и моментов всех заряженных частиц, образованных в мишени.

Кремниевая трековая система состоит из четырех трековых станций, расположенных на расстоянии 50, 60, 75 и 100 см от мишени (рис. 1). Для измерений параметров частиц использованы тонкие кремниевые микростриповые двухсторонние сенсоры с шагом стрипов ~50 мкм, из которых могут быть собраны стандартные блоки детекторных модулей (субмодули) для трековых станций.

Трековые станции построены на детекторных модулях, расположенных “вертикально”, со стрипами ориентированными перпендикулярно к основной отклоняющей плоскости в магнитном поле. При этом электроника первичной обработки информации размещена за пределами активной области STS.

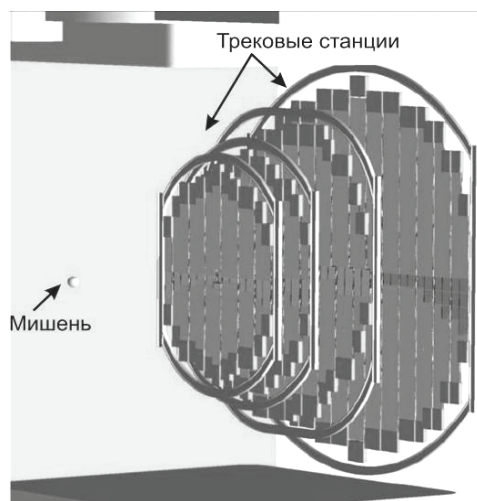


Рис. 1. Внешний вид кремниевой трековой системы

Основной принцип создания детекторов и детекторных модулей для указанного выше эксперимента (в котором принимает участие ГП НИТИП в составе CBM-MPD-STs консорциума (Дубна, Россия; Дармштадт, Германия)) – высокая модульность, минимизация радиационной длины всех составных частей конструкции, которые находятся в рабочем объеме на пути частиц, при обеспечении необходимых характеристик и активном отведении тепла от считывающей электроники. Важнейшей проблемой при разработке детекторных блоков являются согласование электрических параметров линий связи с микросхемами обработки информации и снижение уровня индуцированных в линиях помех. Высокая скорость съема данных требует обеспечения обработки нескольких сотен каналов, передающих информацию, с быстродействием до 100 нс/канал. В целях минимизации массы рассеивающих материалов в активном объеме детекторной станции электроника первичной обработки информации (гибридные микросборки с микросхемами) размещается за пределами активной области трековой системы.

Достижение поставленной цели возможно за счет использования современной элементной базы (тонких двухсторонних кремниевых микроstriповых детекторов, многоканальных малошумящих гибридных микросборок и т.п.) в сочетании с прецизионной коммутацией. Коммутация гибридных микросборок с сенсорами, а также сенсоров между собой выполняется с помощью тонких ультралегких кабелей на основе алюминий-полиимидного диэлектрика [5–10].

Специалистами ГП НИТИП в рамках международного CBM-эксперимента предусмотрено выполнение такого объема работ:

- разработка технологии изготовления коммутационных плат и кабелей;
- разработка инновационной “chip on flex” технологии сборки детекторных модулей;
- разработка и изготовление высокоточной оснастки для сборки модулей;
- изготовление кабелей и гибридных микросборок.

Принципиально новые решения для создания детекторных модулей базируются на результатах и опыте, полученном в рамках проекта ALICE, и требуют дальнейшего усовершенствования технологий изготовления и сборки компонентов детекторных модулей, которые обеспечат минимизацию массы материала (минимизацию фонового излучения) и необходимые количественные показатели по разрешающей способности и надежности.

2. Структура и физические принципы работы кремниевых детекторов, их основные параметры и технология производства.

Детектирование заряженных частиц с помощью кремниевых сенсоров (детекторов) основано на том, что в процессе ионизации частицы передают часть своей энергии среде, в которой они движутся. Средние ионизационные потери заряженной частицы пропорциональны квадрату заряда частицы и не зависят от ее массы M . Зависимость средних ионизационных потерь заряженных частиц от величины $pc/M = \gamma\beta$ имеет минимум при $\gamma \sim 3$, затем логарифмически увеличивается и выходит на плато, которое в твердых веществах всего на $\sim 10\%$ больше, чем минимальное значение. Флуктуации ионизационных потерь обусловлены тем, что столкновения частиц с атомами среды происходит на разном расстоянии, причем часть столкновений происходит на близком расстоянии, и выбитые электроны (δ -электроны) получают энергию, достаточную для того, чтобы, проходя через среду, самим образовывать ионы. Вследствие этого распределение флуктуаций ионизационных потерь резко асимметрично. Высокомный кремний в наибольшей степени пригоден для использования в качестве твердотельного наполнителя ионизационного детектора. Средняя энергия, расходуемая заряженной частицей на образование одной пары носителей в кремнии ($\sim 3,6$ эВ), мала по сравнению с газами, в которых для образования одной пары ионов требуется несколько десятков электрон-вольт. Поэтому генерируемый частицей заряд в кремнии гораздо выше, чем в газе, а его флуктуации в несколько раз меньше. Значение наиболее вероятных потерь ионизирующей частицы в кремнии составляет ~ 28 кэВ на 100 мкм. Отсюда следует, что на этой длине образуется примерно 8 тысяч электронно-дырочных пар. Время сбора заряда в кремниевых детекторах (~ 10 нс) на много меньше типичного времени рекомбинации ($\tau_r = \sim 1$ мс). Поэтому неравновесные заряды, генерированные частицей, полностью собираются на электродах, что обеспечивает максимально возможную величину сигнала, его стабильность и пропорциональность потерянной частицей энергии. Для регистрации заряда, создаваемого частицей в сенсоре, необходимо

минимизировать ток утечки детектора, поскольку от него зависит собственный шум детектора. Однако практически невозможно получить кремний с удельным сопротивлением выше $\sim 1,5 \cdot 10^4$ Ом·см. Достаточно малый ток утечки обеспечивается созданием переходной области между полупроводниками с различными типами проводимости (*p-n*-переход), которая запирается обратным напряжением.

Для производства кремниевых микростриповых детекторов в настоящее время применяется так называемая планарная технология, разработанная для микроэлектроники. Детекторы, изготовленные по планарной технологии, обладают высокой стабильностью, имеют малые обратные токи ($1 \dots 10$ нА/см² при толщине чувствительного слоя 300 мкм и напряжении смещения ~ 100 В). Благодаря применению фотолитографии для формирования рабочих областей (областей с *p-n*-переходом) на поверхности детектора может быть достигнута точность на уровне долей микрона. Это позволяет создавать микростриповые сенсоры, в которых области *p-n*-перехода имеют вид узких (до 5 мкм) полосок (стрипов), разделенных столь же узкими промежутками. При этом стоимость детектора практически не зависит от формы и размеров рабочих областей.

При создании современных детекторных установок высоких энергий решение о выборе размера и формы кремниевого микрострипового детектора принимается исходя из требований конкретной физической задачи и геометрии установки. Для снижения его стоимости стараются использовать всю площадь кремниевых пластин, которые обычно имеют форму диска диаметром 100 или 150 мм. В пределах одной установки часто применяются детекторы различной формы.

Наряду с односторонними микростриповыми детекторами, у которых имеющие форму полосок *p-n*-переходы сформированы только на одной (лицевой) стороне пластины, находят широкое применение двусторонние микростриповые детекторы, где стрипы формируются на обеих сторонах пластины. Несмотря на то, что двусторонние детекторы намного дороже, а их изготовление и монтаж существенно сложнее, с их помощью можно получить вдвое большую информацию о положении трека ионизирующей частицы при том же количестве вещества в детекторе, что очень важно в ряде экспериментов из-за проблемы многократного рассеяния частиц.

Основными параметрами кремниевых сенсоров являются: толщина сенсора, удельное сопротивление кремния, ориентация кристаллографических осей, способ считывания информации (бинарное и аналоговое считывание), шаг считывания и шаг стрипов, емкость стрипов на обратную сторону, межстриповая и переходная емкости, шумы детектора.

3. Инновационная “chip on flex” (COF) технология сборки демонстратора трековой системы на основе алюминий-полиимидных диэлектриков. В настоящее время в ряде отраслей (медицинском приборостроении, в телекоммуникационной отрасли, в робототехнике и др.)

все шире используются сверхбыстродействующие многоканальные бескорпусные микросхемы с шагом контактных площадок 50 мкм и менее, что открывает возможность создания устройств с повышенной функциональной емкостью. Как правило, к таким устройствам предъявляются очень жесткие требования по массогабаритным характеристикам, объему и возможности компоновки изделия в трех плоскостях в виде многослойных блоков и пакетов [4–12]. Проблема соответствия таким высоким требованиям была решена за счет новых конструктивно-технологических решений на основе технологии “кристалл на гибкой плате” или “chip on flex” (COF), которая широко применяется фирмами 3M, Rogers, Olin Mesa и др. [8].

Безадгезивные алюминий-полиимидные лакофольговые диэлектрики, которые используются в качестве гибких коммутирующих элементов в COF-технологии, обладают всеми теми достоинствами, которыми обладают и безадгезивные медь-полиимидные материалы. Однако ряд их преимуществ по сравнению с медь-полиимидными диэлектриками позволил существенно расширить возможности COF-технологии на современном этапе.

Прежде всего алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, алюминий имеет радиационную длину, почти в 6 раз превышающую радиационную длину меди. Несмотря на то что алюминий по сравнению с медью обладает меньшей механической прочностью, меньшей теплопроводностью, удельным электрическим сопротивлением примерно в 1,6 раза большим удельного электрического сопротивления меди, важное значение имеет тот факт, что алюминий почти в 3,5 раза легче меди. Благодаря малой плотности алюминия обеспечивается большая электрическая проводимость на единицу массы. Таким образом, коммутирующие элементы на основе алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков позволяют максимально минимизировать массу вещества в рабочем объеме, что особенно перспективно для сенсорных систем с высокой плотностью каналов информации.

Алюминиевая COF-технология хорошо адаптируется к существующему автоматизированному оборудованию ультразвуковой сварки типа Delvotec. При этом обеспечиваются высокое качество и надежность сварных соединений не только из-за того, что свариваются однородные материалы (алюминиевые контактные площадки электронных компонентов и алюминиевые проводники коммутирующих элементов), но также и из-за того, что сварочные электроды, применяемые в сварочных установках, позволяют обеспечить оптимальные режимы процессов сварки. Кроме того, коммутирующие элементы на основе безадгезивных алюминий-полиимидных диэлектриков позволяют значительно улучшить емкостные характеристики электронных устройств.

Специалистами ГП НИТИП (г. Харьков) разработана и освоена инновационная технология изготовления гибких коммутирующих элементов на основе безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых

диэлектриков и технология сборки детекторных модулей и электронных узлов.

Практическое применение предложенная технология нашла при подготовке международного эксперимента ALICE (CERN, г. Женева, Швейцария) на базе нового ускорителя LHC (Большой Анодный Коллайдер). В этом эксперименте расшифровка процессов соударения разогнанных частиц будет осуществляться с помощью сложнейшей системы детекторов, фиксирующих траектории и энергии родившихся частиц с помощью сотен тысяч каналов обработки информации [11]. На основе разработанной инновационной технологии специалистами ГП НИТИП совместно с членами коллаборации ALICE были созданы микростриповые и дрейфовые детекторные модули (рис. 2) на алюминий-полиимидных гибких кабелях и платах, не имеющие аналогов в мире [10–12].

Гибкие кабели и платы на основе лакофольговых диэлектриков ФДИ-А-50 и ФДИ-А-24 (полиимид толщиной 10...20 мкм и алюминий толщиной 14...30 мкм) характеризуются пластичностью, гибкостью и стабильностью электрических характеристик и успешно заменяют проволочный монтаж при сборке детекторных модулей. За счет компоновки в трех плоскостях обеспечивается перекрытие соседних сенсоров в детектирующих системах, что практически исключает “мертвые зоны”, т. е. зоны, в которых не осуществляется детектирование.

Описанную компоновку невозможно реализовать при проволочном монтаже, так как в этом случае объекты сварки должны иметь одностороннее расположение и практически невозможно изменить конфигурацию проводников после сварки.

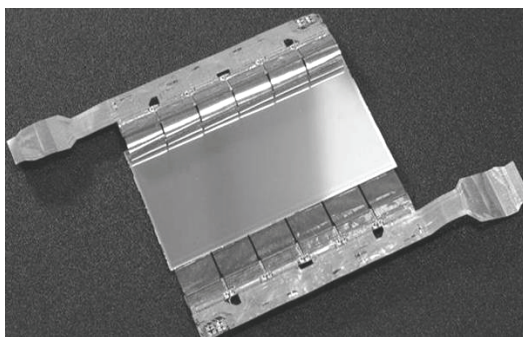


Рис. 2. Микростриповый детекторный модуль

Алюминиевая COF-технология также позволяет без ограничений располагать на одних и тех же гибких платах вместе с кристаллами микросхем различные навесные компоненты.

Разработанная инновационная технология ультразвуковой сварки алюминий-полиимидных плат и кабелей с микросхемами и приемниками радиационного излучения адаптирована для применения автоматизированных сварочных установок типа FK Delvotec-6400, ЭМ-4370 и др., позволяющих обеспечить точность позиционирования при сварке $\pm 3 \dots 5$ мкм.

При участии специалистов ГП НИТИП в разработках гибких кабелей и плат для детекторных модулей международных проектов CBM, ALICE удалось значительно усовершенствовать сборочную технологию “chip on flex” и адаптировать ее к самым высоким современным требованиям и задачам.

Примером решения одной из таких сложных задач может служить проводящиеся на предприятии ГП НИТИП научно-исследовательские работы по созданию нового поколения микроstriповых сенсорных модулей, которые предназначены для использования в трековых системах международных проектов CBM, ALICE.

4. Конструкция демонстратора трековой системы. Результаты испытаний. В ходе выполнения научно-исследовательской работы, проводимой ГП НИТИП совместно с ХНУРЭ в рамках международной программы CBM, спроектирован, создан и испытан на пучке протонов демонстратор трековой системы, состоящий из микроstriпового детектора CBM01 и микрокабелей (рис. 3).

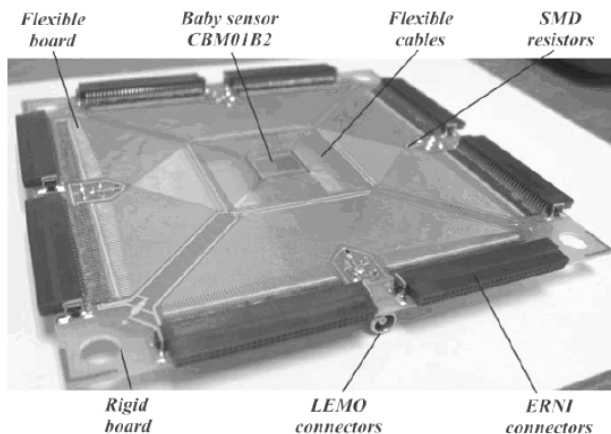


Рис. 3. Внешний вид демонстратора трековой системы

Конструкция демонстратора трековой системы, изображенного на рис. 3, состоит из таких основных частей:

- кремниевое микроstriповое сенсора CBM01 (Baby sensor CBM01B2);

- жесткой несущей платы-основания (Rigid board);
- гибкой платы (Flexible board). Материал: фольгированный диэлектрик FDI-A-50 (толщина слоя алюминия – 30 мкм, толщина полиимидного слоя – 20 мкм);

- гибких сигнальных проводников (Flexible sensor cables);
- ERNI-соединителей (ERNI connectors);
- LEMO-соединителей (LEMO connectors);
- SMD-резисторов номиналом 1 МОм (SMD resistors).

Сборка демонстратора трековой системы осуществлялась в три этапа:

1. Приваривание сигнальных проводников к сенсору посредством ультразвуковой (УЗ) сварки.

2. Сборка гибкой коммутационной платы.

3. Монтаж кремниевого сенсора на жесткое несущее основание модуля.

В 2008 году проведено испытание первого изготовленного образца кремниевого микрострипового демонстратора трековой системы CBM01, предназначенного для FAIR эксперимента. Испытание проходило на установке СВД-2 в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) в г. Протвино (Россия) и способствовало получению учеными важных результатов.

Эксперимент SVD (Спектрометр с детектором вершин), выполнявшийся на ускорителе У-70 (ИФВЭ), основывается на исследовании столкновений сильно разогнанных элементарных частиц: протонов и нейтронов. Эксперимент посвящен исследованию фундаментальных основ процесса "термализации" при столкновении пучка протонов (энергия которых приближается к 70 ГэВ) с мишенью из жидкого водорода. Экспериментальная установка состояла из трех модулей верхнего трекера пучка и пяти детекторов вершин нижнего уровня мишени, все построено на основе кремневых микростриповых сенсоров с высоким пространственным разрешением.

В ходе проведения эксперимента одна из трековых систем установки СВД-2 была модифицирована посредством CBM-демонстратора, что позволило на начальном этапе эксперимента оценить с помощью паразитного пучка ее эффективность. Полученный результат включает: данные о разрешающей способности детектора, полученные с помощью установки СВД-2, измерения пространственного разрешения (меньше 15 мкм) (рис. 4) и эффективности обнаружения частиц. Демонстратор трековой системы функционировал без сбоев и был полностью совместим с экспериментальной установкой СВД. Посредством демонстратора производились последовательные измерения энергии элементарных частиц и их координат.

Опытный образец CBM демонстратора был сконструирован Консорциумом по кремневым трековым системам (CBM-MPD), который объединяет лучших специалистов из разных институтов России, Украины и Германии.

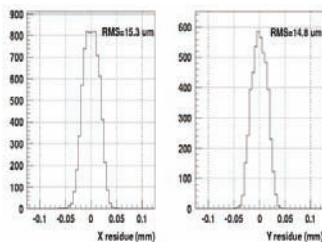


Рис. 4. Результаты испытания демонстратора трековой системы
(пространственное разрешение трека частиц)

Выводы. Проведенные участниками СВМ-MPD-STC консорциума исследования и испытания демонстратора трековой системы доказали, что инновационная алюминиевая COF-технология обладает рядом преимуществ: экономичностью, технологичностью, эффективностью. Обозначенные в работе достоинства этой технологии позволяют эффективно использовать ее для сборки микроstriповых детекторных модулей на базе технологических мощностей ГП НИТИП в рамках международного эксперимента СВМ.

Эта статья обусловлена желанием донести до отечественных и зарубежных потребителей лучшие достижения в области инновационных разработок в Украине, и мы надеемся, что наш опыт может быть полезен всем, кто разрабатывает и эксплуатирует электронные изделия с повышенной функциональной емкостью, высокими требованиями к радиационной стойкости, массогабаритным характеристикам, объему, надежности и долговечности.

Список литературы: 1. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханов И.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна. – М.: Химия, 1986. – 158 с. 2. Александрова Л.Г. Перспективные разработки в области гибких фольгированных диэлектриков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1995. – № 1. – С. 38 – 40. 3. Гончарова Т.С. Полиимидные пленки в качестве межслойных изолирующих и пассивирующих слоев ИС // Зарубежная электронная техника. – 1989. – № 8 (339). – С. 53–82. 4. ECSS-Q-70-71A Space product assurance. Data for selection of space materials and process. – Р. 197. 5. Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Симаков А.Б. Проектирование БИС считывания сигналов микроstriповых детекторов по субмикронной КМОП технологии // Труды XLVIII научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, Москва-Долгопрудный, 25–26 ноября. – 2005. – Ч. II Общая прикладная физика. – с. 110 – 111. 6. Фарассат Ф., Валев С. “Кристалл на плате” (COB): новая эра сборочной технологии // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С. 71 – 76. 7. Handbook of tape automated bonding. - New York: Van Nostrand Reinhold (edited by John H. Lau). - 1991. – 645 p. 8. <http://www.inaeksu.vstu.vinnica.ua/kafs/mpa/microproc/r2.htm#2.1>. 9. Still A. CDF Run II silicon tracking projects // Nucl. Instr. and Meth. – 2000.- A 447.-P. 1 – 8. 10. Merkel P. et al. CDF Run IIb Silicon Detector: The Innermost Layer // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. - Vol. 51, No 5. – P. 2215-2219. 11. Tricomi A. The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test // Nucl. Instr. and Meth.- 2007. - A 570. – P. 248 – 252. 12. List B. The H1 silicon tracker // Nucl. Instr. and Meth.- 2005.- A 549. – P. 33 – 36.

Поступила в редколлегию 08.07.11